

DOI: 10.11779/CJGE202206004

橡胶掺量对格栅-橡胶砂界面宏观细观剪切特性影响

刘飞禹¹, 符军¹, 王军^{2*}, 李婧婷¹, 应梦杰¹

(1. 上海大学力学与工程科学学院, 上海 200444; 2. 温州大学建筑工程学院, 浙江 温州 325035)

摘要: 为了研究土工格栅-橡胶砂界面的剪切特性, 通过室内大型直剪仪, 分析了不同橡胶掺量、相对密实度和竖向应力下界面的剪应力-剪切位移关系及体变特性; 并基于室内试验, 建立关于 PFC^{3D} 的纯砂和橡胶砂直剪模型, 揭示土工格栅加筋橡胶砂在直剪过程中的细观力学机理。研究表明: 在相同密实度下橡胶砂剪切强度随着橡胶掺量增加先增大后减小, 其最优橡胶掺量为 10%, 且越松散由橡胶掺量引起的剪切强度差 ($|\tau_0 - \tau_{50}|$) 越大; 在纯砂中掺入一定量橡胶颗粒能增大其似黏聚力和内摩擦角, 但影响其剪切强度以内摩擦角为主; 橡胶颗粒掺入致使剪切带相对厚度变小, 橡胶颗粒对砂颗粒的转动起抑制作用, 使得橡胶砂的孔隙率的变化量小于纯砂; 橡胶砂组构分布能够反映接触力的分布, 整体上颗粒间接触点数量比纯砂的略多, 法向接触力和切向接触力比纯砂小; 橡胶颗粒掺入增大了体系的阻尼耗能, 提高了混合物的弹性。

关键词: 橡胶砂; 筋土界面; 橡胶掺量; 剪切带; 组构各向异性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)06-1006-10

作者简介: 刘飞禹(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事加筋土和土动力学方面的研究。E-mail: lfyju@shu.edu.cn。

Effects of rubber content on macro- and meso-scopic shear characteristics of geogrid-rubber sand interface

LIU Fei-yu¹, FU Jun¹, WANG Jun², LI Jing-ting¹, YING Meng-jie¹

(1. School of Mechanics and Engineering Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: A large-scale direct shear apparatus is used to study the interface shear properties of the geogrid-reinforced rubber-sand mixture. The variations of shear stress with shear displacement and volume deformation characteristics are analyzed under different rubber contents, relative densities and normal stresses. Based on the indoor experiments, direct shear models for sand and rubber-sand mixture on PFC^{3D} are established to reveal the meso-mechanical mechanism of geogrid-reinforced rubber-sand mixture in the direct shear process. The results show that the shear strength of rubber-sand mixture rises first and then drops with the increase of rubber content under the same compaction. The optimal rubber content is 10%. The looser the mixture is, the greater the difference is in shear strength ($|\tau_0 - \tau_{50}|$) caused by the rubber content. Adding some rubber particles in sand can increase its apparent cohesion and interface friction angle, but the shear strength is mainly affected by the latter. The relative thickness of the shear band becomes smaller in view of the entry of rubber particles. The rubber particles inhibit the rotation of the sand particles, making the porosity change of the rubber-sand mixture smaller than that of the sand. The fabric distribution of the rubber-sand mixture can reflect the distribution of contact force, and the number of touch points among particles is a little more than that of the sand. The normal contact force and tangential contact force of the mixture are smaller than those of sand. The addition of rubber particles increases the damping energy consumption of the system and improves the elasticity of the mixture.

Key words: rubber-sand mixture; reinforcement-soil interface; rubber content; shear band; fabric anisotropy

0 引言

废旧轮胎已成为当今社会的主要固体废弃物之一, 将其切碎成橡胶颗粒或碎片掺入土中作为岩土工程材料, 其具有材质轻、渗透性强、弹性好等工程特点, 并在加筋土结构中得到了广泛的应用^[1-3]。其中,

筋土界面的相互作用特性是衡量其结构稳定性和安全性的重要依据^[4]。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52078285, 51878402, 51978534)

收稿日期: 2021-07-21

*通信作者 (E-mail: sunnystar1980@163.com)

在常规筋土界面相互作用方面, 朱顺然等^[5]发现砂土的剪胀性与叠环的水平位移变化密切相关, 土工织物置入抑制了砂土的剪胀。Liu 等^[6-7]、Wang 等^[8]采用动态直剪仪进行了循环直剪试验, 研究了颗粒粒径、颗粒形状、粒孔比等因素对土工格栅 - 土界面直剪特性的影响。Vieira 等^[9]对于砂土 - 土工织物界面, 采用了位移控制与应力控制两种方式分析试验结果的差异。

关于“橡胶砂”的室内剪切特性试验研究, 李丽华等^[10]调整轮胎碎片含量和纵横比, 使其内摩擦角可达 65° 。刘方成等^[11]基于三轴试验研究橡胶砂强度特性, 发现土工格栅对橡胶含量为 20% 橡胶砂的加筋效应最明显。Zhou 等^[12]对饱和橡胶砂进行直剪试验, 发现向砂中添加橡胶颗粒改变了剪切应力 - 水平位移的发展, 并可略微提高其剪切强度和显著提高其抗液化性能。刘启菲等^[13]通过固结不排水静三轴试验, 发现随橡胶颗粒含量的增加, 混合料的破坏模式由部分软化 - 剪胀向完全硬化 - 剪缩转变; 而 Ding 等^[14]通过固结不排水单调和循环三轴试验, 进行橡胶砂静、动态剪切特性分析, 发现最佳橡胶含量约为 10%。

室内直剪试验可从宏观上分析橡胶砂的抗剪强度及变形特性, 扫描电镜试验能够定性评价颗粒混合物微观结构的变化^[15], 但都无法从细观层面揭示橡胶砂的剪切特性机理。近年来以 PFC 为代表离散元法, 在岩土工程中得到了广泛运用。关于纯砂的细观力学机理方面, 孔亮等^[16]基于 PFC^{2D} 直剪数值模拟, 探讨了纯砂力学性质的细观机制; 苗晨曦等^[17]采用 PFC^{3D} 模拟三向土工格栅拉拔过程, 研究界面宏 - 细观力学响应关联, 揭示了砂土细观组构指标与拉拔力之间的变化规律。关于橡胶砂的细观力学机理方面, Lopera 等^[18]、Gong 等^[19]基于三轴试验建立橡胶砂数值模型, 研究橡胶大小和橡胶掺量对颗粒间强弱力链的影响规律。Lee 等^[20]对等粒径橡胶砂进行二维离散元模拟, 发现在小应变下情况下橡胶颗粒掺入增加了颗粒间配位数和限制了混合物的塑性。

综上所述, 橡胶颗粒掺入砂土中作为复合岩土散体材料, 该混合物与土工格栅的界面剪切特性试验研究及结合离散元方法进行细观分析较少。本文采用室内大型直剪仪, 对土工格栅加筋的橡胶砂混合物 (RSM) 在不同橡胶含量、相对密实度和竖向压力下, 进行界面试验研究, 并结合 PFC^{3D} 建立数值模型进行细观力学机理分析, 研究土工格栅 - 橡胶砂界面宏观剪切特性。

1 试验介绍

1.1 试验设备

试验采用微机控制电液伺服动态直剪仪, 仪器示

意图如图 1 所示。直剪仪尺寸上剪切盒 $600 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$, 下剪切盒 $800 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 。剪切过程中固定上剪切盒, 移动下剪切盒。该仪器由水平、垂直双向加载器与传感器构成, 机载软件自动记录数据。本试验采用位移控制的方式进行。

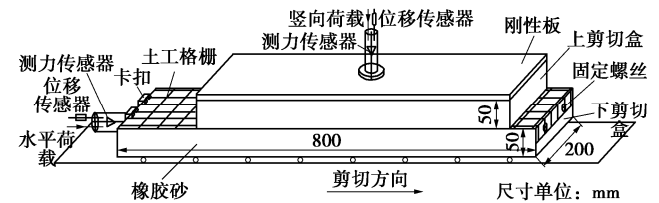


图 1 大型直剪仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of large-scale direct shear apparatus

1.2 试验材料

试验用砂土为中国 ISO 标准砂, 废旧轮胎经切屑绞碎并筛分得到颗粒状橡胶, 粒径范围为 $3 \sim 6 \text{ mm}$ (图 2), 其各项物理性质指标见表 1, 其级配曲线见图 3。加筋材料选用双向塑料土工格栅见图 4, 其各项技术指标示见表 2。

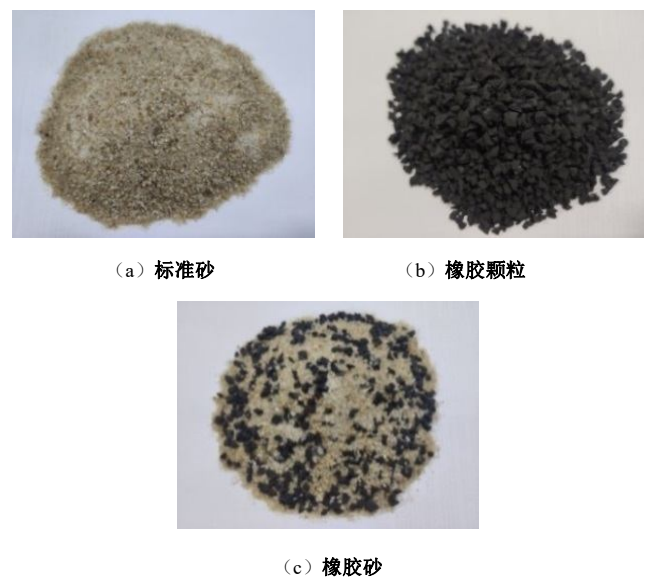


图 2 试验试样

Fig. 2 Test specimens

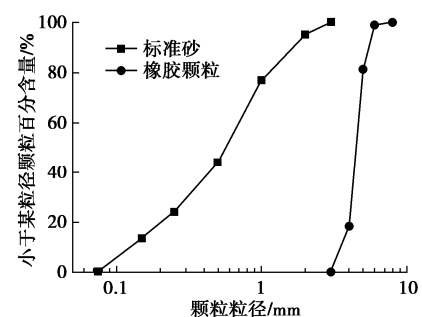


图 3 砂土与橡胶颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves of sand and rubber particles

表1 砂土和橡胶的物理性质指标

Table1 Physical property indexes of sand and rubber

材料	最大干密度 度/(g·cm ⁻³)	最小干密度 度/(g·cm ⁻³)	相对质量 密度	不均匀 系数 C _u	曲率系数 C _c	有效粒径 d ₁₀ /mm	连续粒径 d ₃₀ /mm	平均粒径 d ₅₀ /mm	限制粒径 d ₆₀ /mm
砂土	1.85	1.59	2.71	5.75	1.09	0.129	0.323	0.590	0.742
橡胶	0.69	0.52	1.21	1.32	1.06	3.533	4.182	4.500	4.659

表2 土工格栅技术指标

Table 2 Technical indexes of geogrid

土工合 成材料	单位面 积质量 /(g·m ⁻²)	网孔尺寸 (长×宽 /mm)	纵横 肋尺 寸/mm		极限延伸率 /%		极限抗拉强 度/(kN·m ⁻¹)	
			纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向
聚丙烯土 工格栅	340	30×30	4.4	13	13	20	20	

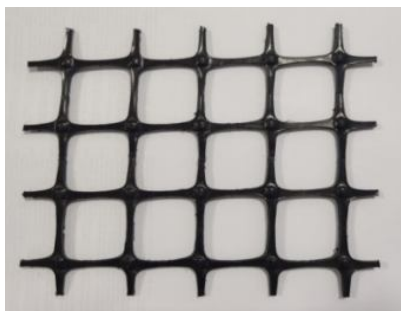


图4 土工格栅

Fig. 4 Photo of geogrid

1.3 试验方案

本文分别考虑在不同的竖向应力、密实度下，纯砂、橡胶砂（橡胶体积占比分别为10%，20%，30%，40%，50%）与土工格栅界面的静力剪切特性试验。参照相应规范，将各组试验的剪切速率设定为1 mm/min^[21]，具体试验方案见表3。

2 试验结果分析

2.1 橡胶掺量的影响

由图5, 6可知，纯砂和橡胶砂在不同竖向应力下均出现一定程度的剪切软化，在剪切过程中均是先剪

缩后剪胀，说明纯砂和橡胶砂在密实状态具有相似的性质，且橡胶掺量越大其剪缩量越大、剪胀量越小。可以发现随着橡胶颗粒掺量的逐渐增加，峰值剪应力与残余强度均是先增大后减小，且峰值剪应力较残余强度变化更明显，当橡胶颗粒掺量为10%时，土工格栅-橡胶砂界面的剪切强度最大。

表3 试验方案

Table 3 Test plans

橡胶含量 x/%	相对密实度 D _r /%	竖向应力 σ/kPa	剪切速率 v/(mm·min ⁻¹)
0	30.0,53.7,68.7	30,60,90	1.0
10	30.0,53.7,68.7	30,60,90	1.0
20	68.7	30,60,90	1.0
30	30.0,53.7,68.7	30,60,90	1.0
40	68.7	30,60,90	1.0
50	30.0,53.7,68.7	30,60,90	1.0

从图7可以看出，橡胶颗粒含量为10%是一个转折点，在上述不同竖向应力下，剪切强度较纯砂分别提高7.2%，5.7%，6.3%。但超过10%，随着橡胶颗粒掺量增大，橡胶砂剪切强度逐渐降低，并小于纯砂的剪切强度，且竖向应力越大橡胶砂剪切强度小于纯砂剪切强度所对应的橡胶颗粒含量越小。当橡胶颗粒的掺量相同时，竖向应力增加会导致橡胶砂的剪切强度增大。

根据试验数据，采用莫尔-库仑准则计算得到界面的似黏聚力c和内摩擦角φ如图8所示。从图中可以看出，当橡胶掺量逐渐增大，似黏聚力和内摩擦角均先增大后减小，掺入少量橡胶颗粒能使砂土的似黏聚力和内摩擦角增大。在砂土中掺入橡胶颗粒后，其结

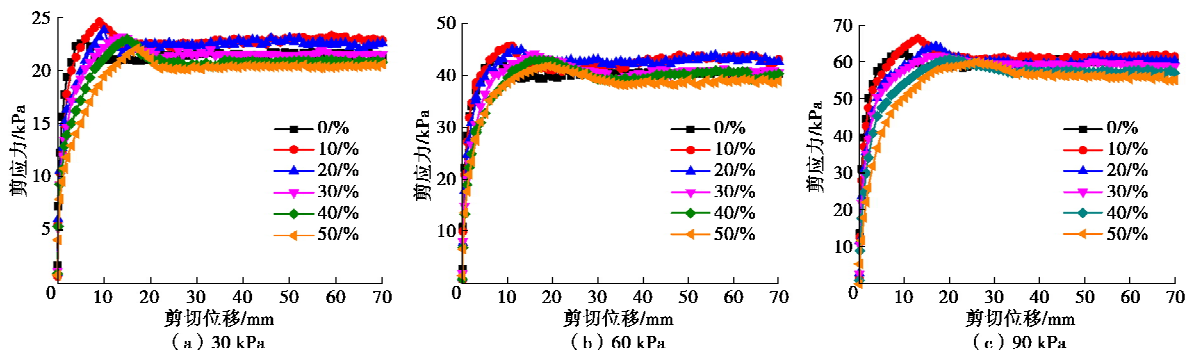


图5 剪应力-剪切位移关系曲线

Fig. 5 Relation curve of shear stress and shear displacement

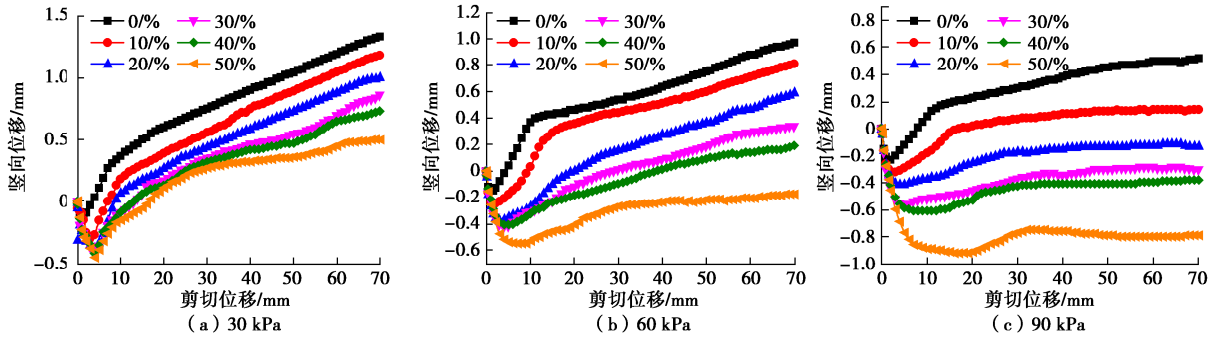


图 6 竖向位移 - 剪切位移关系曲线

Fig. 6 Relation curve of vertical displacement and shear displacement

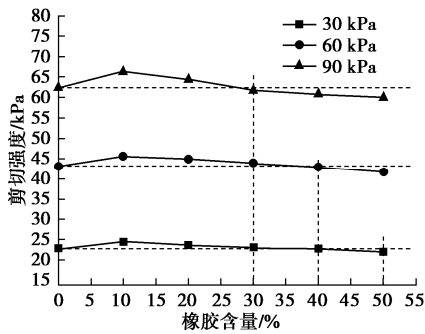


图 7 剪切强度 - 橡胶含量关系曲线

Fig. 7 Relation curve of shear strength and rubber content

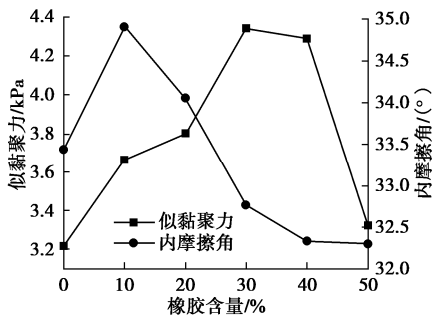


图 8 似黏聚力和内摩擦角与橡胶颗粒含量关系曲线

Fig. 8 Relation curve of cohesion and internal friction angle with rubber content

构（颗粒间接触）发生了改变。当掺入少量橡胶颗粒时，混合物主要是砂 - 砂接触，新增少量砂 - 橡胶接触和橡胶 - 橡胶接触，滑动摩擦的增加使内摩擦角增大；当橡胶掺量逐渐增加时，砂 - 橡胶接触和橡胶 - 橡胶接触逐渐增多，颗粒间咬合摩擦减小的程度要大于滑动摩擦的增加程度，因此混合物的内摩擦角逐渐减小。当橡胶掺量为 10% 时内摩擦角最大，且与似黏聚力相比内摩擦角变化趋势和剪切强度变化趋势较一致，因此内摩擦角为剪切强度的主要影响指标。

2.2 相对密度的影响

根据不同密实度下单调直剪试验，得到结果如图 9 所示（竖向应力 60 kPa、橡胶掺量 10%）。

结合图 9 (a) 中和文献[22]可知，随着相对密实

度减小，橡胶砂由剪切软化型转变为剪切硬化型以及其界面剪切强度和残余强度的变化规律与纯砂基本相同。由图 9 (b) 可知，当密实度较小橡胶砂界面的体变一直处于剪缩状态并逐渐平缓；而当密实度较大时，试样在剪切初期发生少量的剪缩之后，然后一直处于剪胀状态。

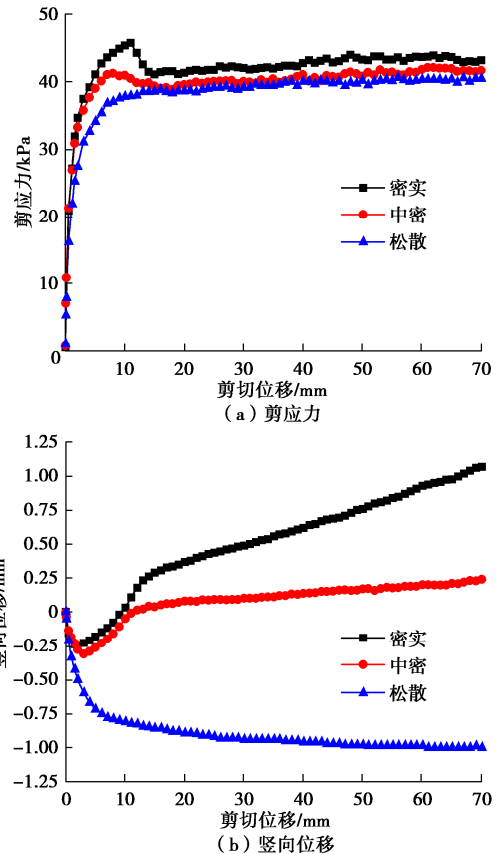


图 9 不同橡胶砂密实度下单调直剪试验结果

Fig. 9 Results of monotonic direct shear tests under different relative densities of rubber sand mixture

关于剪切强度取值，其中有剪切软化现象的取剪应力峰值为界面剪切强度，对于剪切硬化的曲线，本文将曲线出现明显的拐点时剪切位移所对应的剪应力作为其界面的剪切强度^[22]。不同密实度下橡胶砂的剪切强度随橡胶含量的变化如图 10 所示。

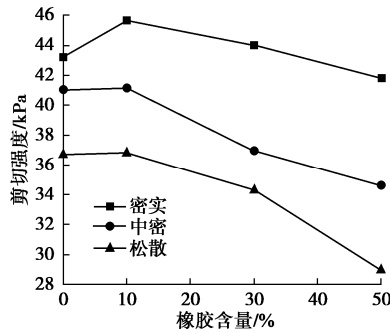


图 10 不同相对密实度下剪切强度与橡胶颗粒含量关系曲线

Fig. 10 Relationship between shear strength and rubber particle content under different relative densities

由图 10 可知,在相同橡胶含量下,橡胶砂越密实其剪切强度越大;在同一密实状态,其剪切强度随着橡胶含量变化的趋势一致,且越松散由橡胶掺量引起的剪切强度差越大 ($|\tau_0 - \tau_{50}|$)。

3 离散元细观分析

3.1 模型建立

PFC^{3D} 数值模拟作为对室内直剪试验的有力补充,本文主要分析直剪过程中的细观力学机理。数值模型采用的剪切盒尺寸与试验一致,通过生成刚性墙模拟剪切盒,通过生成 clump 刚性簇模拟加载板。考虑计算机效率和剪切宏观影响,此次模拟中采用半径扩大法生成颗粒,半径乘子为 3.5,试样颗粒总数目分别是纯砂 29131 个、橡胶砂 27197 个(10%橡胶含量),单独生成土工格栅颗粒数 6720 个,不同材料的颗粒采用 group 关键词加以区别,蓝色代表砂颗粒、绿色代表橡胶颗粒。数值试样模型局部颗粒及土工格栅如图 11 所示。

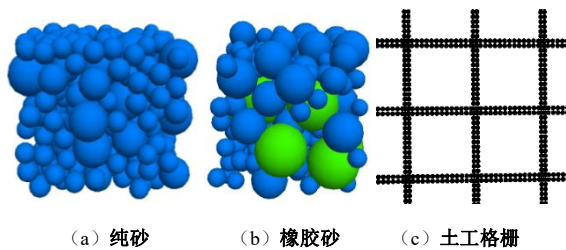


图 11 模拟试样及土工格栅局部图

Fig. 11 Partial drawing of simulated specimens and geogrid

模型中橡胶颗粒和砂颗粒均采用线性接触模型,土工格栅采用平行黏结模型,其主要细观参数见表 4,宏观拉力 - 应变关系如图 12 所示,能基本拟合土工格栅的受拉性能^[23]。

为了使模拟的效果与试验结果更匹配,模型加载方式与直剪仪工作方式基本相同。通过改变调试颗粒接触刚度、孔隙率、颗粒摩擦系数等细观参数来匹配

试验的宏观剪切特性。竖向应力为 60 kPa 下模拟结果与室内试验的对比如图 13 所示,竖向应力为 30, 90 kPa 同理。

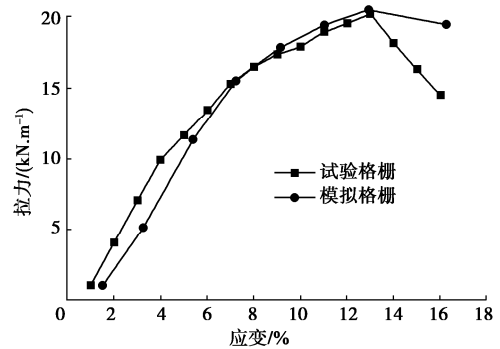


图 12 土工格栅拉力 - 应变关系

Fig. 12 Relationship between pull and strain of geogrid

表 4 土工格栅细观参数

Table 4 Mesoscopic parameters of geogrid

颗粒密度 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏结半 径/mm	平行黏结模型 杨氏模量/GPa	刚度 比	法向黏结 强度/GPa	切向黏结 强度/GPa
640	1.0	63	1.0	7.5	7.5

从图 13 中的数值模拟结果和室内试验结果对比分析中,发现两者曲线变化规律基本相同,从而验证 PFC^{3D} 数值模型的正确性,其细观参数取值如表 5 所示。

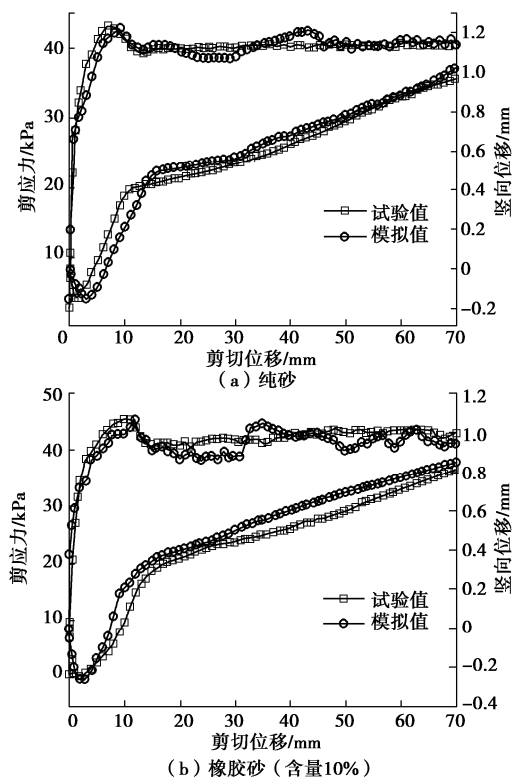


图 13 纯砂和橡胶砂数值模拟与室内试验的拟合曲线

Fig. 13 Fitting curves of pure sand and rubber sand by numerical simulation and laboratory tests

表 5 橡胶砂微观参数标定值

Table 5 Calibrated values of mesoscopic parameters of rubber sand mixture

参数名称	单位	标定值
砂土颗粒法向接触刚度	N/m	2.0×10^6
砂土颗粒切向接触刚度	N/m	1.0×10^6
橡胶颗粒法向接触刚度	N/m	2.0×10^3
橡胶颗粒切向接触刚度	N/m	1.0×10^3
墙体法向接触刚度	N/m	2.0×10^8
墙体切向接触刚度	N/m	1.0×10^8
刚度比	—	2.0
颗粒摩擦系数	—	0.54
墙体摩擦系数	—	0
砂土颗粒密度	kg/m ³	2340
橡胶颗粒密度	kg/m ³	1100
孔隙率	—	0.34

3.2 细观力学响应分析

(1) 剪切带与颗粒位移场

土体非连续性、局部化变形是土力学特性研究中重要的研究问题。为了研究剪切过程中在水平方向不同位置处试样的变形发展情况，本次模拟在试样中设置了 12 个黑色纵条，在剪切开始前完成并编号，观测剪切过程中纵条的变形发展过程如图 14 所示。

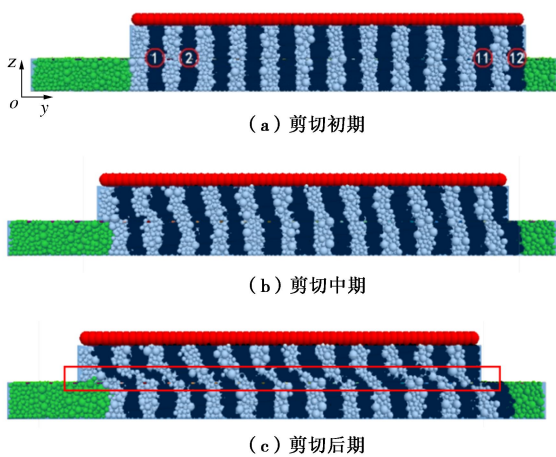


图 14 试样变形演变

Fig. 14 Deformation evolution of specimens

由图 14 可以看出，剪切初始时，所有纵条的颗粒相对位置较固定；剪切中期时，纵条①、②和⑪、⑫产生了较小的变形。之后变形逐渐向中部传递，在剪切面附近形成了一个变形较大的条带，条带以外变形很小，且剪切带两端区域变形量大于中间区域。图 14 (c) 中红线框出条带区域即为剪切带，纯砂和橡胶砂厚度分别为 $9d_{50R}$ 、 $7.5d_{50RSM}$ 。从微观角度，剪切过程中试样在剪切带内的颗粒运动较剧烈。

对三维模型进行切片处理，截取 xoz 平面（图 14

中展示的平面，下同）上有一定厚度的平面，观察分析二维平面内颗粒运动情况如图 15。剪切初期颗粒位移场是杂乱无序的，颗粒的运动方向是随机的；剪切中期下剪切盒中的绝大部分颗粒整体向右运动，上剪切盒中的绝大部分颗粒向上运动，如图 15 (b) 中红箭头所指方向。剪切后期，下盒颗粒几乎向右一致运动，且位移最大；界面上方附近的颗粒有向右运动的痕迹，有一定的位移，离界面较远的上盒颗粒几乎静止，说明受到剪切作用影响较小。

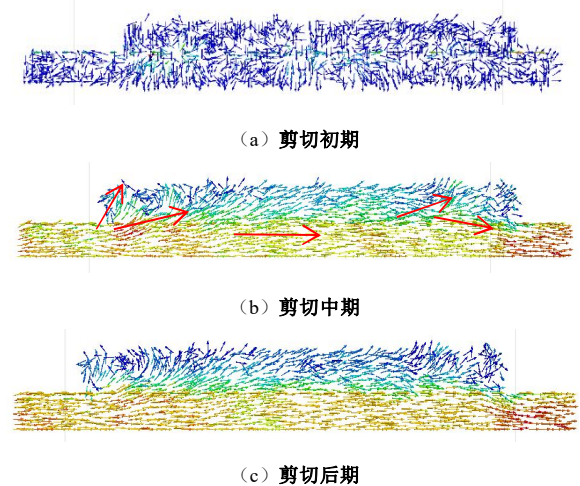


图 15 剪切过程中位移场变化

Fig. 15 Change of displacement field during shearing

(2) 组构各向异性演化和力链

取剪切过程中试样的接触法向、法向接触力和切向接触力在 xoz 平面上投影，绘制其玫瑰图如图 16~18。玫瑰图中按每 10° 划分一个计算区间，关于圆的半径：图 16 中的数值为法向接触数量，图 17, 18 中的数值为法向接触力和切向接触力的平均值。

分析图 16 可知，剪切初始时，接触法向偏于竖直的接触点个数略多，但各个方向大体相同；剪切开始后， $30^\circ \sim 60^\circ$ 接触数量明显增加，接触法向的各向异性演化比较明显；接着残余阶段接触法向的主轴方向变化不大，整个外形轮廓有细微的改变。剪切盒内产生柱状力系与竖向加载有关，而接触法向的主方向会靠近大主应力方向。此外，橡胶颗粒比砂颗粒更柔性，使得颗粒间接触的机会增大，因此从整体上橡胶砂的接触点数量比纯砂的略多。

接触力为法向和切向接触力的合力。由图 17, 18 可知，直剪过程中与切向接触力相比，法向接触力大将近一个数量级，切向接触力的贡献对接触力的影响很小。所以，可视为法向接触力分布的演化状况实质上接近力链网络的变化情况^[24]。

从图 17, 18 可见，直剪过程中法向接触力分布类似花生状，主轴方向剪切初期接近 90° ，剪切中后期落在 $30^\circ \sim 60^\circ$ ，力链网络的变化情况与其大体相

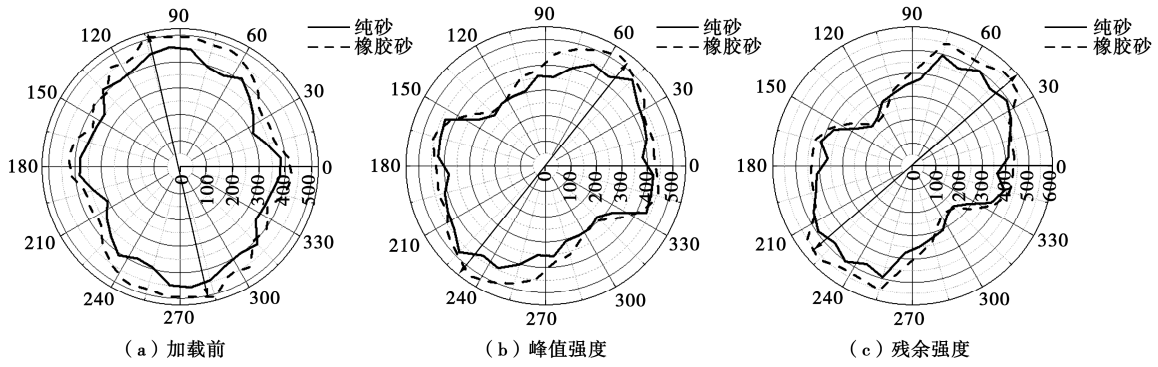


图 16 接触法向分布

Fig. 16 Distribution of normal contact direction

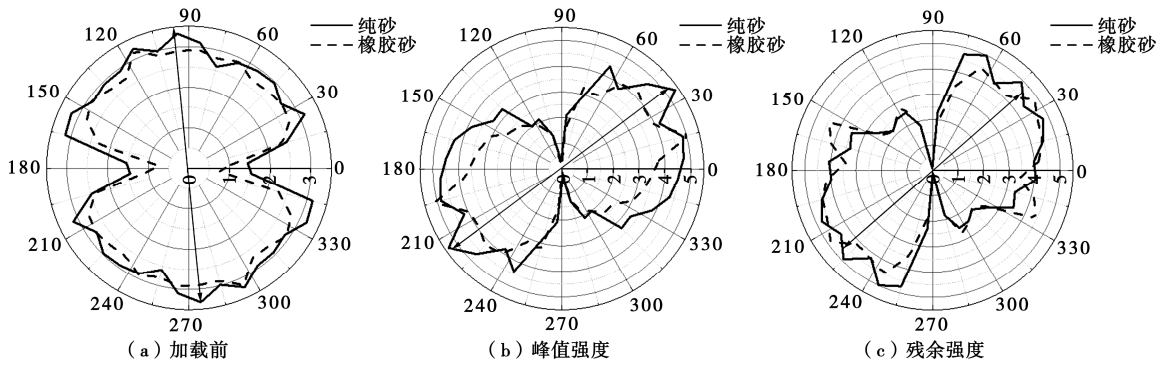


图 17 法向接触力分布

Fig. 17 Distribution of normal contact force

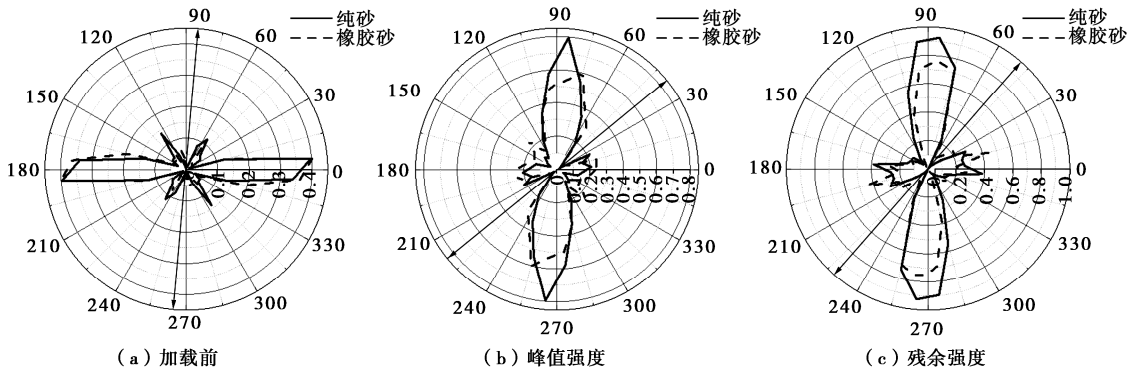


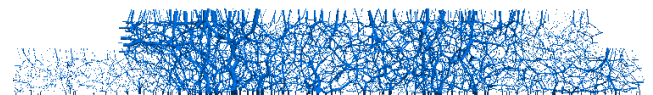
图 18 切向接触力分布

Fig. 18 Distribution of tangential contact force

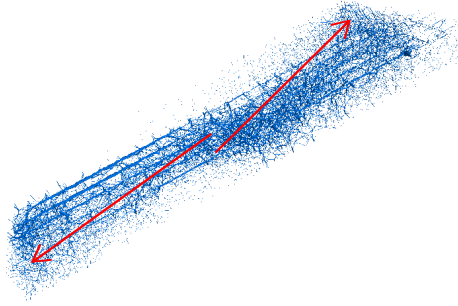
同，且可知从剪切初始至达到峰值应力过程中法向接触力有增大的趋势。切向接触力分布类似花瓣状，在剪切过程中其主方向变化与大主应力方向相近。并发现橡胶砂的法向和切向接触力整体上比纯砂小。

力链网络是试样在受外力作用时颗粒间接触力的力学响应形式。从图 19 (a) 中可看出试样在加竖向恒载后、剪切初始时，强力链呈竖向均匀分布；之后，强力链网络逐渐向区域右上角和左下角区域集中，力链网络的分布变化很大，形成了数条贯通的强力链^[25]，沿着 30° ~ 60° 的方向倾斜分布，且在土工格栅附近也有强力链形成，如图 18 (b) 所示。

橡胶颗粒与砂颗粒混在一起受力后，砂颗粒由于承担大部分荷载，使砂颗粒间接触力链更集中；而掺入的橡胶颗粒受到挤压更容易产生变形，其与砂颗粒能更好接触、咬合。因此，在剪切过程中橡胶颗粒掺入使颗粒间的接触状态发生了改变，有效限制了颗粒的滚动和滑动，利于形成稳定的强力链，使试样抵抗外力的能力增强，从而提高了试样的宏观剪切强度。



(a) 剪切初期

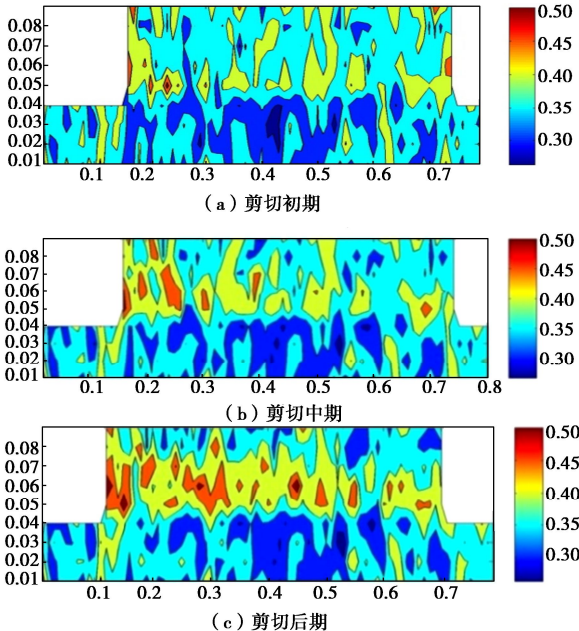


(b) 剪切破坏后
图 19 接触力链

Fig. 19 Contact force chain

(3) 孔隙率

按 10 mm 的间距设置测量球, 对试样在 xoz 平面上的孔隙率变化情况进行监测, 用 Matlab 软件作图 20 (图中横纵坐标分别为剪切盒高度和长度, 单位: m)。从图中可看出, 剪切前整个试样的孔隙率分布较均匀; 剪切后的孔隙率, 下盒变化较很小、上盒演变剧烈。在剪切过程中, 试样在剪切面处孔隙率从两端起步增大并逐渐向中部发展直至贯通。最后, 一个孔隙率明显增大的带状区在剪切面附近形成, 这是由剪切时带内颗粒产生转动使颗粒间的孔隙变大造成的。但由于界面处土工格栅对靠近下盒的颗粒运动有一定的限制作用, 使界面处靠近上盒的颗粒运动更剧烈。



(a) 剪切初期
(b) 剪切中期
(c) 剪切后期
图 20 孔隙率分布

Fig. 20 Distribution of porosity

将孔隙率监测位置分 3 个区域, 即剪切带外的上盒 (S1 和 RSM1)、剪切带内 (S2 和 RSM2)、剪切带外的下盒 (S3 和 RSM3), 它们的孔隙率变化量如图 21 所示。从图 21 中可看出, 剪切带内孔隙率增大明显, 剪切带外两个区域的孔隙率变化量相对较小, 也验证了对图 20 中孔隙发展情况的分析。因为橡胶颗粒

变形能力比砂颗粒大, 掺入橡胶后颗粒间能更好地接触、咬合, 且橡胶颗粒对砂颗粒的转动有一定的抑制作用, 使得从整体上橡胶砂的孔隙率的变化量小于纯砂。在直剪过程中, 密实的橡胶砂与密砂一样, 试样整体的剪胀主要是剪切带内产生剪胀的影响, 在剪切带外产生的剪胀量很小。

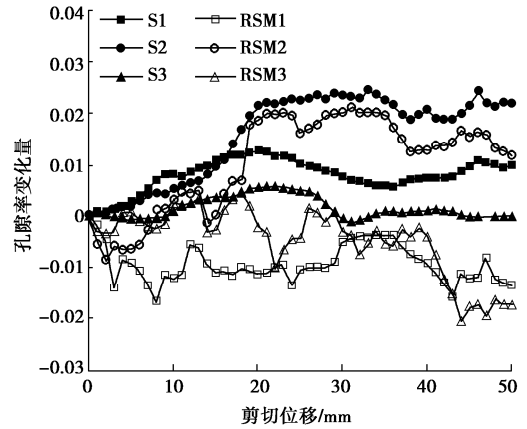


图 21 孔隙率 - 剪切位移关系曲线

Fig. 21 Relationship between porosity and shear displacement

(4) 能量变化

为更为直观的探究混合颗粒体系能量变化, 主要监测了颗粒的动能和阻尼耗能, 如图 22 所示。可发现, 在该剪切体系中, 体系动能迅速减小并逐渐趋近于零, 阻尼耗能逐渐增加, 且体系的动能的远小于阻尼耗能。从图中可以看出, 橡胶颗粒掺入对体系的动能影响不大, 但增大了体系的阻尼耗能, 新增了砂 - 橡胶接触和橡胶 - 橡胶接触, 颗粒之间碰撞的机会增加, 且橡胶颗粒的变形能力更强, 即体系更容易变形, 所以说橡胶颗粒掺入砂土中提高了混合颗粒体系的弹性。

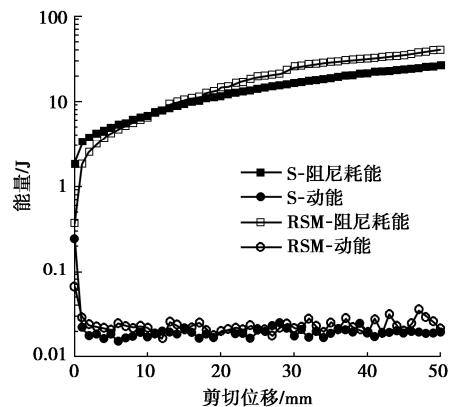


图 22 阻尼耗能和动能与剪切位移关系曲线

Fig. 22 Relation curve of damping energy dissipation and kinetic energy with shear displacement

4 结 论

(1) 掺入一定量橡胶颗粒能增大砂土的剪切强度, 但当橡胶颗粒超过一定量其剪切强度反而比纯砂

小；当橡胶掺量为 10% 时，橡胶砂的剪切强度最大。

(2) 纯砂和橡胶砂在密实状态具有相似的性质，在同一密实状态其剪切强度随着橡胶含量增加先增大后减小，且越松散由橡胶掺量引起的剪切强度差 ($|\tau_0 - \tau_{50}|$) 越大。

(3) 纯砂和橡胶砂剪切带厚度分别约为 $9d_{50,S}$ 、 $7.5d_{50,RSM}$ 。颗粒位移场和孔隙率变化规律符合室内试验结果，且更直观，从细观上揭示了试样在剪切过程中的剪胀情况。

(4) 橡胶砂的组构各向异性演化规律与接触力的分布变化情况一致，且两者均偏向主应力的方向；橡胶颗粒掺入砂土中提高了混合物的弹性。

参考文献：

- [1] BALUNAINI U, YOON S, PREZZI M, et al. Pullout response of uniaxial geogrid in tire shred-sand mixtures[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2014, 32(2): 505 - 523.
- [2] MANOHAR D R, ANBAZHAGAN P. Shear strength characteristics of geosynthetic reinforced rubber-sand mixtures[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4): 910 - 920.
- [3] MADHUSUDHAN B R, BOOMINATHAN A, BANERJEE S. Static and large-strain dynamic properties of sand-rubber tire shred mixtures[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(10): 04017165.
- [4] WANG J, YING M J, LIU F Y, et al. Experimental investigation on the stress-dilatancy response of aggregate-geogrid interface using parameterized shapes[J]. Construction and Building Materials, 2021, 289: 123170.
- [5] 朱顺然, 徐超, 丁金华. 土工织物-砂土界面的叠环式剪切试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1775 - 1780, 1788. (ZHU Shun-ran, XU Chao, DING Jin-hua. Laminated shear test of geotextile-sand interface[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1775 - 1780, 1788. (in Chinese))
- [6] LIU F Y, WANG P, GENG X, et al. Cyclic and post-cyclic behaviour from sand-geogrid interface large-scale direct shear tests[J]. Geosynthetics International, 2016, 23(2): 129 - 139.
- [7] LIU F Y, YING M J, YUAN G H, et al. Particle shape effects on the cyclic shear behaviour of the soil-geogrid interface[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2021, 49(4): 991 - 1003.
- [8] WANG J, LIU F Y, ZHENG Q T, et al. Effect of aperture ratio on the cyclic shear behaviour of aggregate-geogrid interfaces[J]. Geosynthetics International, 2021, 28(2): 158 - 173.
- [9] VIEIRA C S, LOPES M L, CALDEIRA L M. Sand-geotextile interface characterisation through monotonic and cyclic direct shear tests[J]. Geosynthetics International, 2013, 20(1): 26 - 38.
- [10] 李丽华, 肖衡林, 唐辉明, 等. 轮胎碎片-砂混合土抗剪性能优化试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1063 - 1067. (LI Li-hua, XIAO Heng-lin, TANG Hui-ming, et al. Shear performance optimizing of tire shred-sand mixture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1063 - 1067. (in Chinese))
- [11] 刘方成, 吴孟桃, 杨峻. 土工格栅加筋橡胶砂强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(2): 580 - 591. (LIU Fang-cheng, WU Meng-tao, YANG Jun. Experimental study of strength characteristics of geogrid reinforced rubber sand mixtures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(2): 580 - 591. (in Chinese))
- [12] ZHOU E Q, WANG Q. Experimental investigation on shear strength and liquefaction potential of rubber-sand mixtures[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 5934961.
- [13] 刘启菲, 庄海洋, 陈佳, 等. 废旧轮胎橡胶颗粒-砂混合料抗剪强度与破坏模式试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1887 - 1895. (LIU Qi-fei, ZHUANG Hai-yang, CHEN Jia, et al. Tests on shear strength and failure mode of rubber particle-sand mixtures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10): 1887 - 1895. (in Chinese))
- [14] DING Y, ZHANG J S, CHEN X B, et al. Experimental investigation on static and dynamic characteristics of granulated rubber-sand mixtures as a new railway subgrade filler[J]. Construction and Building Materials, 2021, 273: 121955.
- [15] 张涛, 蔡国军, 刘松玉, 等. 橡胶-砂颗粒混合物强度特性及微观机制试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(6): 1082 - 1088. (ZHANG Tao, CAI Guo-jun, LIU Song-yu, et al. Experimental study on strength characteristics and micromechanism of rubber-sand mixtures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(6): 1082 - 1088. (in Chinese))
- [16] 孔亮, 陈凡秀, 李杰. 基于数字图像相关法的砂土细观直剪试验及其颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2971 - 2978. (KONG Liang, CHEN Fan-xiu, LI Jie. Meso-direct-shear test of sand based on digital image correlation method and its PFC numerical simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2971 - 2978. (in Chinese))
- [17] 苗晨曦, 郑俊杰, 崔岚, 等. 格栅-砂土界面宏细观关联性与加筋性能评价方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 3249 - 3258. (MIAO Chen-xi, ZHENG

- Jun-jie, CUI Lan, et al. Study of the macro-meso correlation of geogrid-soil interface and assessment method of reinforced performance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, **35**(S1): 3249 - 3258. (in Chinese))
- [18] LOPERA PEREZ J C, KWOK C Y, SENETAKIS K. Micromechanical analyses of the effect of rubber size and content on sand-rubber mixtures at the critical state[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2017, **45**(2): 81 - 97.
- [19] GONG L X, NIE L, XU Y, et al. Discrete element modelling of the mechanical behaviour of a sand-rubber mixture containing large rubber particles[J]. Construction and Building Materials, 2019, **205**: 574 - 585.
- [20] LEE C, SHIN H, LEE J S. Behavior of sand-rubber particle mixtures: experimental observations and numerical simulations[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, **38**(16): 1651 - 1663.
- [21] 公路工程土工合成材料试验规程: JTG E 50—2006[S]. 2006. (Test Methods of Geosynthetics for Highway Engineering: JTG E 50—2006[S]. 2006. (in Chinese))
- [22] 王 军, 王 攀, 刘飞禹, 等. 密实度不同时格栅-砂土界面循环剪切及其后直剪特性[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(2): 342 - 349. (WANG Jun, WANG Pan, LIU Fei-yu, et al. Cyclic and post-cyclic direct shear behaviors of geogrid-sand interface with different soil densities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(2): 342 - 349. (in Chinese))
- [23] 周 健, 王家全, 孔祥利, 等. 砂土颗粒与土工合成材料接触界面微观研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(1): 61 - 67. (ZHOU Jian, WANG Jia-quan, KONG Xiang-li, et al. Mesoscopic study of the interface between sandy soil and geosynthetics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(1): 61 - 67. (in Chinese))
- [24] 史旦达, 周 健, 刘文白, 等. 砂土直剪力学性状的非圆颗粒模拟与宏观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1557 - 1565. (SHI Dan-da, ZHOU Jian, LIU Wen-bai, et al. Exploring macro- and micro-scale responses of sand in direct shear tests by numerical simulations using non-circular particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1557 - 1565. (in Chinese))
- [25] WANG C, DENG A, TAHERI A. Three-dimensional discrete element modeling of direct shear test for granular rubber-sand[J]. Computers and Geotechnics, 2018, **97**: 204 - 216.

中国土木工程学会第十四届全国土力学及岩土工程学术大会 (第一号通知)

主办单位: 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会

承办单位: 中国科学院武汉岩土力学研究所; 岩土力学与工程国家重点实验室

征文内容: 会议主要研讨双碳战略下岩土工程理论与实践、新技术和新方法等。组委会接受全文投稿, 大会学术委员会将组织专家成立论文评审委员会。征文内容主要包括以下14个方面。①岩土基本性质与本构关系; ②岩土工程勘察、测试与评价; ③地基处理与基础工程; ④特殊土力学与工程; ⑤边坡工程与地质灾害; ⑥地下工程及能源储备; ⑦土动力学与岩土地震工程; ⑧海洋岩土力学与岛礁工程; ⑨环境岩土工程与固废处置; ⑩二氧化碳地质利用与封存; ⑪数值仿真与岩土工程大数据; ⑫岩土工程新材料、新装备与智能建造; ⑬岩土力学与工程前沿交叉; ⑭重大岩土工程实录。

投稿要求: 大会组委会于2022年7月1日开始接收论文投稿。应征论文须符合上述征文内容要求且未公开发表。投稿时须向会务组提交全文电子文件(投稿邮箱附后), 论文请按《岩

土力学》期刊格式撰写, 论文模板请登录《岩土力学》网站下载中心下载, 来稿务请注明作者的详细通讯地址、E-mail及联系电话。

根据被录用论文的研究内容与学术水平, 分别推荐论文由《Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering》、《岩土力学》、《岩石力学与工程学报》、《土木工程学报》、《岩土工程学报》、《力学与实践》、《土工基础》等近10个国内高水平期刊以正刊、专刊或增刊形式发表, 其中多本期刊的专刊或增刊可被SCI或EI检索。热忱欢迎国内外从事岩土工程勘察、设计、检测监测、科研教学、设备和施工领域的科技工作者踊跃投稿。

联系方式: 郭 妍(13871535559), 卢 正(13469993948), 刘 磊(15871497846), 孙冠华(18672321892); 湖北省武汉市武昌八一路小洪山2号, 中国科学院武汉岩土力学研究所(430071); E-mail: cismge2023@whrsm.ac.cn; 电话: 027-87198413。

(大会组委会 供稿)